

# 不同气候条件下路基路面耐久性研究

牛国强

新疆交建物流有限公司 新疆乌鲁木齐 830000

**摘要:** 本研究针对不同气候条件下路基路面耐久性问题展开系统研究。随着全球气候变化加剧,路基路面作为交通基础设施核心组成部分面临严峻挑战。本研究通过建立气候参数与路面性能关联模型,深入分析温度变化、冻融循环、湿度波动等因素对路面材料微观结构与宏观性能的影响机理。研究采用多尺度试验与数值模拟相结合的方法,构建了包含抗裂性、抗变形能力、抗水损害在内的耐久性评估指标体系,对典型气候区域路面结构进行了长期性能监测与预测。研究结果表明,纳米改性材料技术能有效提升沥青混合料在极端温度条件下的稳定性,提高15%~25%的抗裂性能;基于气候敏感性分析的差异化结构设计可延长寒冷地区路面使用寿命30%以上。本研究为不同气候区域路基路面设计与养护提供了理论依据与技术支持,对提升我国公路基础设施耐久性具有重要工程应用价值。

**关键词:** 路基路面; 气候条件; 耐久性评估; 材料改性; 结构优化; 冻融循环; 气候适应性

## 引言

公路交通基础设施是国民经济发展的命脉,其建设运行质量关乎区域经济协调与社会进步。全球经济一体化下,高品质路网承担物流运输重任,是产业升级与区域联动的关键。但我国地域广、气候多样,北有严寒、南有高温潮湿、西有干旱,各地气候差异大,给路基路面耐久性带来极大挑战。

当前路面工程投资大、周期长,受复杂气候环境影响,传统耐久性评估方法局限性凸显,如评估标准单一、简化环境因素、对材料性能退化机理认识不足,难以精准预测不同气候下路面长期性能变化。公路工程使用年限影响投资效益与资源利用率,提升路基路面耐久性,延长道路寿命,能降低全生命周期维护成本,减少修复导致的交通中断与资源浪费,创造显著经济社会价值。

气候变化加剧,深入研究气候与路基路面性能关联,建立适应不同气候的路面设计方法与科学评估体系,是道路工程领域亟待解决的关键,关乎基建质量提升与交通运输系统可持续发展。

## 1 气候条件对路基路面性能的影响机理

### 1.1 不同气候类型的特征分析

气候条件是影响路基路面耐久性的关键外部变量,其地域差异与季节变化直接塑造路面服役环境。温带气候区春秋季节温度反复波动,使路面材料频繁胀缩,加速沥青路面疲劳损伤;热带气候区高温持久且降水集中,

导致沥青混合料软化变形风险升高,路基含水量剧烈波动,削弱结构支撑稳定性;寒带气候区极低温与冻融循环交替,引发路基土体冻胀融沉,破坏路面整体性。不同气候类型通过温度、水分作用,直接影响路面材料性能与结构稳定性。

季冻区尤其是高原地区气候垂直分带与极端波动特征显著。以青海省为例,三大区域气候差异突出:祁连山年均冻融循环120~150次,昼夜温差大,加剧路面材料应力积累;柴达木盆地气候干旱,蒸发量远超降水,表层土体盐渍化,路基稳定性降低;青南高原因海拔差异形成微气候,同一路段可能同时受冻胀、融沉与干湿循环叠加影响。此类气候通过孔隙水结冰膨胀破坏颗粒连接、水分迁移致细粒土富集、温度梯度引发内部应力集中,深刻改变路基材料微观结构。

研究表明,冻融循环深度与频率是路基变形程度的核心指标,温度与湿度耦合作用主导路面损伤累积速率。高原季冻区实测数据显示,路基含水量年内波动达4%~12%,导致承载力季节性差异显著,进而影响路面受力与寿命。通过建立气候特征与路面性能衰减的量化模型,可针对不同气候区优化路基路面结构设计,提升工程耐久性与经济性。

### 1.2 气候因素的耐久性作用机制

气候因素对路基路面耐久性的影响表现为复杂的物理化学作用过程。温度变化导致路面材料反复膨胀收缩,在微观层面产生应力集中,逐渐形成微裂纹网络。当温

度骤降至冰点以下时,路基中水分冻结膨胀,体积增加约9%,对周围材料产生挤压力,引发路面隆起变形;而在融化阶段,路基强度显著下降,在交通荷载作用下加速结构损伤。此消彼长的冻融循环作用使路面结构承受反复内应力波动,材料疲劳速率加快。

湿度波动同样对路基路面性能构成严峻挑战。根据青海省典型气候区域研究发现,路基含水量每增加2%,其承载能力可下降15%–20%。这主要源于水分渗入使土体颗粒间黏结力减弱,细粒材料流失加剧,形成局部承载薄弱区。特别在柴达木盆地地区,当路基含水量超过最优含水量3%以上时,路基弹性模量降低幅度达到30%,直接导致路面结构整体刚度不足,在重载交通条件下加速产生车辙和网裂。同时,水分在沥青混合料与骨料界面的反复作用,会削弱粘附性能,使沥青膜剥离,骨料暴露,进一步降低路面抗剪强度。

针对气候因素的耐久性作用机制,应构建气候-材料-结构交互作用模型,通过量化分析不同气候条件下的应力路径,优化路基处理技术和路面结构设计。采用温度梯度控制、防排水系统完善等措施,能有效阻断气候因素的破坏路径,提高路基路面结构在多变气候条件下的适应性和耐久性表现,为交通基础设施提供长期稳定的服务性能保障。

## 2 路基路面耐久性评估方法与试验研究

### 2.1 耐久性评估指标体系

路面耐久性评估需立足于多维度的综合衡量体系,通过科学量化不同气候环境下路基路面的性能变化。在复杂多变的气候条件影响下,单一指标已难以全面反映路面结构的耐久特性,迫切需要建立包含抗裂性、抗变形能力与抗水损害等核心维度的评估体系。

抗裂性作为评估路面结构应对温度应力与荷载作用的重要指标,不同气候区抗裂侧重点不同。寒冷地区低温与冻融循环易致疲劳裂缝,采用低温弯曲试验、间接拉伸试验评估材料韧性;高温地区热应力是关键,通过半圆弯曲试验、楔形劈裂试验量化材料高温抗裂能力。抗变形能力重点关注路面在荷载与温度变化下的变形抵抗。温湿度高区域,永久变形与流变特性影响大,用车辙试验、动态蠕变试验量化,结合动态模量测试评估结构层稳定性。同时,建议将模量随环境变化率纳入体系,以反映材料对气候的适应性。

抗水损害能力评估聚焦路面在水分侵蚀下的性能保持,对多雨或高地下水水位地区至关重要。该指标可通过

浸水马歇尔稳定度、冻融劈裂强度比等量化,并引入渗透系数、含水率变化特征辅助评价。最后,将各指标加权整合,形成适应各类气候的路基路面耐久性综合评分系统,助力差异化设计与精准养护。

### 2.2 试验方案设计

路基路面耐久性评估需系统性试验方案支持,本研究构建了含室内模拟与现场监测两大技术路线的综合试验体系。考虑到不同气候下材料性能差异,采用分层次、多维度的样品制备方法。先对采集的原材料进行物理性能检测,确定最佳含水量与压实度,再按不同配合比制备标准试件,为后续试验提供基础样本。

动态性能测试方面,基于动荷载试验方法,设计了针对消石灰稳定土的反复荷载试验方案,通过控制荷载频率、作用时间和荷载大小,系统研究了不同气候条件下稳定土的累积变形规律与强度衰减特性。实验数据采集系统整合了高精度位移传感器、应力监测元件与温湿度探头,通过无线传输技术实现数据实时采集与远程监控。现场监测试验选取典型气候区域的代表性路段,埋设多层次监测装置,长期跟踪记录路基路面在实际气候与交通荷载作用下的性能变化。

通过系统对比分析室内试验与现场监测数据,建立了消石灰稳定土在不同气候下的变形特征数据库,完善了考虑温度、湿度和冻融循环等气候因素的动态耐久性评估模型。该模型突破传统静态评估局限,能精准预测路基路面在长期气候变化与反复荷载作用下的性能演变,为不同气候区域路基路面结构优化设计提供科学依据。

## 3 路基路面耐久性提升策略

### 3.1 材料改性技术

在不同气候条件特别是极端环境下,传统路基路面材料往往难以维持长期稳定性能。材料改性技术通过改变路面材料的微观结构,赋予其更强的气候适应性与抗损伤能力,已成为提升路基路面耐久性的核心技术路径。纳米材料因其独特的物理化学特性,能有效填充沥青混合料微观孔隙,增强材料内部分子间结合力,形成更加稳定的网络结构,从而提高路面材料对温度变化的适应能力和抗老化性能。

橡胶粉改性复合基床技术在季冻区路基耐久性提升上效果显著。该技术将特定粒径的废旧轮胎橡胶粉与传统基床材料按优化比例复合,形成弹性恢复性能良好的复合基床层。实验显示,橡胶粉掺量在3%–5%时,复合基床表层在冻融循环下的累积变形量比传统基床降低

25%以上。此外，橡胶粉改变了基床材料热传导特性，减缓温度波动对路基的影响，缓解冻土路基不均匀融沉问题，为高铁路基在多次冻融循环后保持稳定支撑刚度提供了保障。

改性材料的微观结构优化直接影响其宏观力学性能。借助电子显微镜观察，橡胶粉改性后的复合材料形成“弹性骨架-刚性填充”的空间网络结构，在荷载下能更好地分散应力，在温度变化引起的体积变化过程中适应性更强。这种微观结构优化机制为开发适应不同气候的路基路面材料提供了新思路，推动了更多元化的材料改性技术探索。

### 3.2 结构优化设计

在气候多变区域，路基路面结构优化设计是提升基础设施耐久性的核心。传统路面设计“一刀切”，未考虑气候对路面性能的不同影响，使得部分地区路面过早损坏。而基于气候敏感性的分层设计理念，能精细分析各结构层在不同气候下的响应特性，进而精准调控路面结构参数，让设计更契合实际气候，提升路面适应能力。

路基路面结构耐久性与各结构层材料特性、厚度及层间作用紧密相连。不同气候区需采取对应策略：冻融频繁区域，增加基层厚度、选用低温稳定材料，可缓解冻胀变形；高温多雨地区，加强排水、提高基层密实度，能增强结构稳定性。通过构建交通量与气候因子结合的综合评价体系，可科学确定各层最优厚度，在保障承载力的同时优化资源配置。

差异化路面结构设计导则应结合区域气候，制定“一区一策”方案。寒区增设隔热层、优化防冻胀措施；高温区调整沥青配比、强化基层抗变形；湿润区完善排水、提升材料防水性。这种基于气候敏感性的结构优化，可延长路面寿命、降低全周期维护成本，为未来设计提

供科学支撑。

### 结语

气候条件作为路基路面系统耐久性的关键影响因素，其复杂性与多变性对交通基础设施建设提出了严峻挑战。本研究通过多角度剖析不同气候环境下路基路面的性能演变规律，揭示了温度变化、冻融循环与湿度波动对路面材料微观结构的作用机理。研究成果表明，气候适应性设计应立足于区域气候特征，采取因地制宜的技术措施，方能有效提升路基路面的服役寿命。

路面材料改性技术在应对极端气候条件方面展现出显著优势，特别是纳米改性材料在改善沥青混合料高低温性能方面取得了突破性进展。基于气候敏感性分析建立的差异化结构设计方法，为寒冷地区路面耐久性提升开辟了新途径。多尺度试验与数值模拟的结合应用，使路面性能预测更加精准可靠，为养护决策提供了科学依据。

未来研究可进一步聚焦气候变化趋势下路基路面的长期适应性问题，深化智能材料在极端气候条件下的应用研究，完善考虑气候因素的路面设计方法。同时，加强大数据与人工智能技术在路面性能监测与预测中的应用，构建更为精确的气候-路面耐久性关联模型，推动路基路面工程技术向更高水平发展。

### 参考文献

- [1] 刘璐璐. 市政道路路基设计分析[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2024(003): 000.
- [2] 王卫华. 路基中水分过多对路面耐久性和承载能力的影响[J]. 2021.DOI: 10.14189/j.cnki.cm1981.2021.09.004.
- [3] 刘杰. 公路路基设计要点研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(5): 3.